

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-339603

(43)Date of publication of application : 02.12.2004

(51)Int.Cl.

C22C 38/00

C21D 9/46

C22C 38/58

C22C 38/60

H01F 1/16

(21)Application number : 2003-433858

(71)Applicant : JFE STEEL KK

(22)Date of filing : 26.12.2003

(72)Inventor : OMURA TAKESHI

KONO MASAOKI

TAKASHIMA MINORU

KONO MASAKI

(30)Priority

Priority number : 2003122745

Priority date : 25.04.2003

Priority country : JP

(54) HIGH-STRENGTH NON-ORIENTED ELECTROMAGNETIC STEEL SHEET SUPERIOR IN HIGH-FREQUENCY MAGNETIC PROPERTY, AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a non-oriented electromagnetic steel sheet having high-frequency magnetic properties together with high strength, and to provide an industrially stable manufacturing method therefor.

SOLUTION: This electromagnetic steel sheet has a composition comprising, by mass%, 1.0-7.0% Si, 1.0-8.0% Cr, 0.35-3.0% Cu and the balance Fe with unavoidable impurities; and further includes 106 pieces/mm² or more of Cu precipitates having an average particle diameter of 15 nm or smaller.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-339603

(P2004-339603A)

(43) 公開日 平成16年12月2日(2004.12.2)

(51) Int.Cl.⁷

F I

テーマコード (参考)

C 2 2 C 38/00

C 2 2 C 38/00 3 O 3 U

4 K O 3 3

C 2 1 D 9/46

C 2 1 D 9/46 5 O 1 B

5 E O 4 1

C 2 2 C 38/58

C 2 2 C 38/58

C 2 2 C 38/60

C 2 2 C 38/60

H O 1 F 1/16

H O 1 F 1/16 A

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2003-433858 (P2003-433858)
 (22) 出願日 平成15年12月26日 (2003.12.26)
 (31) 優先権主張番号 特願2003-122745 (P2003-122745)
 (32) 優先日 平成15年4月25日 (2003.4.25)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000001258
 J F E スチール株式会社
 東京都千代田区内幸町二丁目2番3号
 (74) 代理人 100072051
 弁理士 杉村 興作
 (72) 発明者 大村 健
 東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J
 F E スチール株式会社内
 (72) 発明者 河野 雅昭
 東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J
 F E スチール株式会社内
 (72) 発明者 高島 稔
 東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J
 F E スチール株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板およびその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 良好な高周波磁気特性と高強度とを両立した無方向性電磁鋼板およびこの鋼板を工業的に安定して生産することを可能とする製造方法について提案する。

【解決手段】 Si: 1.0~7.0mass%、Cr: 1.0~8.0mass%、Cu: 0.35~3.0mass%を含有し、残部がFeおよび不可避免の不純物の成分組成とし、さらに平均粒径が15nm以下のCu系析出物を 10^6 個/mm²以上存在させる。

【選択図】 なし

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

Si : 1.0~7.0mass%、
Cr : 1.0~8.0mass%、
Cu : 0.35~3.0mass%、
Mn : 3.0mass% 以下 (0 mass% を含む)、
Al : 3.0mass% 以下 (0 mass% を含む)、
P : 1.0mass% 以下 (0 mass% を含む) および
Ni : 5.0mass% 以下 (0 mass% を含む)

を含有し、残部がFeおよび不可避的不純物の成分組成を有し、さらにCu系析出物の平均粒径が15nm以下、かつCu系析出物の存在頻度が 10^6 個/mm²以上であることを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板。 10

【請求項 2】

請求項 1 において、成分組成として、さらに
Sb : 0.002~0.5mass% および
Sn : 0.002~0.5mass%

のいずれか 1 種または 2 種を含有することを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板。

【請求項 3】

Si : 1.0~7.0mass%、
Cr : 1.0~8.0mass%、
Cu : 0.35~3.0mass%、
Mn : 3.0mass% 以下 (0 mass% を含む)、
Al : 3.0mass% 以下 (0 mass% を含む)、
P : 1.0mass% 以下 (0 mass% を含む) および
Ni : 5.0mass% 以下 (0 mass% を含む)

を含有し、残部がFeおよび不可避的不純物の成分組成を有するスラブに、熱間圧延を施し、そのままあるいは焼鈍した後、冷間圧延および/または温間圧延を施して最終板厚とし、次いで仕上げ焼鈍を、最終到達温度が650~1150℃および引き続き冷却過程の900~400℃における冷却速度が10℃/s以上の条件下に施し、その後400~650℃の温度にて時効処理を施すことを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板の製造方法。 20 30

【請求項 4】

請求項 3 において、スラブの成分組成として、さらに
Sb : 0.002~0.5mass% および
Sn : 0.002~0.5mass%

のいずれか 1 種または 2 種を含有することを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、無方向性電磁鋼板、特に高速回転モータのロータを典型例とする、大きな応力がかかる部品に用いて好適な、高強度でかつ高周波鉄損が優れる無方向性電磁鋼板およびその製造方法に関するものである。 40

【背景技術】

【0002】

近年、モータの駆動システムの発達により、駆動電源の周波数制御が可能となり、可変速運転や商用周波数以上で高速回転を行うモータが増加している。このような高速回転を行うモータでは、高速回転に耐え得るロータが必要になる。すなわち、回転体に作用する遠心力は回転半径に比例し、回転速度の 2 乗に比例して大きくなるため、中・大型の高速モータではロータに作用する応力が600MPaを超える場合もある。従って、こうした高速回 50

転モータでは、ロータの強度が高いことが必要となる。

【0003】

また、近年のモータ効率向上の観点から、その使用が増加した、ロータに永久磁石を埋め込んだ磁石埋設型DCインバータ制御モータでは、遠心力でロータから磁石が飛び出そうとするが、これを抑える際に、ロータに使用された電磁鋼板には大きな力が掛かる。このためにも、モータ、特にロータに使用される電磁鋼板には、高強度が必要とされている。

【0004】

モータ、発電機などの回転機器は、電磁気現象を利用するため、その素材には磁気特性、すなわち低鉄損、高磁束密度であることが望ましい。通常、ロータコアはプレス打ち抜きした無方向性電磁鋼板を積層して使用するが、高速回転モータにおいてロータ素材が上述の機械強度を満足できない場合は、より高強度の鋳鋼製ロータなどを使用せざるを得ないのが現状である。しかしながら、鋳物製ロータは一体物であるため、ロータに作用するリップル損と呼ばれる高周波磁束による渦電流損が電磁鋼板を積層したロータより大きく、モータ効率が低下してしまう要因となっている。従って、磁気特性に優れ、かつ高強度の電磁鋼板がロータ用素材として要望されているのである。

【0005】

金属学的には、高強度化の手段として、固溶強化、析出強化および結晶粒微細化の3つの方法が知られており、電磁鋼板に適用した例も見られる。例えば、固溶強化を利用したものとしては、特許文献1には、Si含有量を3.5~7.0mass%に高めたうえに固溶強化能の大きい元素を添加する方法が開示されている。また、特許文献2には、Si含有量を2.0~3.5mass%とし、NiあるいはNiとMnの両方の含有量を高め、650~850℃という低温焼鈍により製造することで再結晶粒径を制御する方法が開示されている。さらに、析出強化を利用する方法としては、特許文献3に、Si含有量を2.0~4.0mass%とし、Nb, Zr, Ti, Vの微細な炭化物、窒化物を析出させる方法が開示されている。

【0006】

これらの方法により、ある程度の高強度を有する電磁鋼板が得られる。しかしながら、特許文献1に記載されるようなSi量が多い鋼では、冷間圧延性が著しく低下し、安定的な工業生産が困難となる不利がある。さらに、この技術により得られる鋼板は磁束密度 B_{50} が1.56~1.60Tと大幅に低下してしまうという問題もあった。

【0007】

特許文献2における方法では、機械強度を高めるため低温焼鈍による再結晶粒成長の抑制が必要となるため、磁気特性、特に比較的周波数の低い1kHz以下での鉄損が低下するという問題があった。また、Si添加量も従来のそれを越えたものではなく、1kHz以上の鉄損もまだ不十分であった。

【0008】

一方、特許文献3に記載の方法では、炭、窒化物自体が磁壁移動の障壁となるため、また炭、窒化物が電磁鋼板の結晶粒成長を妨げるため、鉄損に劣るという問題がある。

【0009】

また、数百Hz~数十kHzの高周波域で使用される高速回転モータにおいて、従来のSi量が3.5mass%以下の無方向性電磁鋼板を使用すると、鉄損が大きくなりモータ効率の低下要因となる。従って、高速回転モータのロータコア材には、高強度だけでなく、優れた高周波鉄損特性も併せて要求される。

【0010】

この高周波域での鉄損特性を改善するには、鋼の電気抵抗を高めることが重要であり、一般にSiやAlの含有量を増す手法が採られていた。しかし、Si量が3.5mass%を超えると、鋼が極めて硬くそして脆くなり、加工性が劣化するために、通常の圧延による製造および加工が困難になる。特に、Si量が5.0mass%を超える場合には、冷間加工は勿論のこと、温間加工も不可能になってしまう。

【0011】

これに対して、出願人は、高Si鋼にCrを添加することにより、高Si鋼の脆性が改善し、

10

20

30

40

50

高い電気抵抗と加工性とを両立させ得ることを見出し、特許文献4において、高周波磁気特性に優れたFe-Cr-Si系電磁鋼板について提案した。このCrの添加技術により、高合金化が可能となったことから、優れた高周波鉄損特性のみならず、固溶強化により、ある程度の高強度を得るに到ったが、上記した現在の高速回転モータに要求される強度特性としては未だ不十分であった。

【特許文献1】特開昭60-238421号公報

【特許文献2】特開昭62-256917号公報

【特許文献3】特開平6-330255号公報

【特許文献4】特開平11-343544号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

以上のように、従来の方法は、安定的に工業生産可能な電磁鋼板において、高強度と高周波域での低鉄損とを両立するという観点からは、いずれも満足できるものでは無かった。

【0013】

本発明は、良好な磁気特性、特に高周波域での低鉄損と高強度とを両立した無方向性電磁鋼板およびこの鋼板を工業的に安定して生産することを可能とする製造方法について提案することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0014】

発明者らは、上記課題を解決するために、Cuを含んだ鋼の時効硬化現象に着目して種々の検討を行った。すなわち、表1に示す成分を有する鋼に、熱間圧延、次いで冷間圧延を施して0.25mm厚とし、その後、表2に示す条件に従って、仕上げ焼鈍そして時効処理を行って得た鋼板について、強度および履歴損を調査した。その結果を、表2に併記する。

【0015】

また、鋼板におけるCu系析出物の径についても調査し、このCu系析出物の径と履歴損との関係を図1に示す。ここで、Cu系析出物の径は、鋼板を走査透過型電子顕微鏡（STEM）を用いて観察（暗視野像）する際、 10^8 nm^2 の範囲に存在するCu系析出物の径を円相当径として求め、それらの求めた値を平均したものである。なお、観察された析出物がCu系析出物かどうかはEDX分析によって識別した。

【0016】

10

20

30

表 1

【表 1】

鋼記号	成分組成												
	C (ppm)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (ppm)	Al (%)	N (ppm)	O (ppm)	Sb (%)	Sn (%)	Ti (%)	Nb (%)	Cr (%)
I	16	2.5	0.25	0.02	7	1.2	18	15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	3.2
II	11	2.5	0.25	0.02	7	1.2	10	12	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	3.2
													1
													0.01
													0.01

10

20

30

40

50

【 0 0 1 7 】

【表 2】

表 2

鋼記号	板厚 (mm)	最終仕上げ焼鈍条件			時効温度 (°C)	時効時間 (hr)	履歴損 $W_{H_{10}/k}$ (W/kg)	降伏強度 (MPa)	存在頻度 (個/mm ²)	Cu系析出物径 (nm)
		焼鈍雰囲気	焼鈍温度 (°C)	冷却速度 (°C/s)						
I	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	500	24	13.9	570	0	析出なし
II	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	500	12	14.3	715	1.9×10^8	3
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	500	24	14.5	725	2.1×10^8	8
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	550	12	14.4	730	2.2×10^8	5
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	550	24	14.8	720	2.1×10^8	12
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	680	8	17.6	600	1.8×10^8	25
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	680	12	18.9	595	1.2×10^8	40
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	680	24	19.2	585	1.0×10^8	50
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	5	500	24	19.3	580	8.0×10^7	70

10

20

30

40

50

【0018】

表2、そして図1に示す結果から、次の知見が得られた。すなわち、鋼板中の析出物は高強度化に寄与するものの磁壁移動を抑制するため履歴損を劣化させるという、従来知見に反して、時効処理により15nm以下のサイズの極微細に析出したCuは、高強度化に寄与しつつ、履歴損はほとんど劣化させないという、新たな知見を得た。

【0019】

この新規知見に基づき、Cr添加による高電気抵抗化技術と、Cuの極微細析出による高強度化技術とを組み合わせることによって、安定した工業生産が可能である、良好な高周波磁気特性を有する高強度の無方向性電磁鋼板を開発するに到ったのである。

【0020】

本発明の要旨構成は、以下の通りである。

(1) Si: 1.0~7.0mass%、Cr: 1.0~8.0mass%、Cu: 0.35~3.0mass%、Mn: 3.0mass%以下(0mass%を含む)、Al: 3.0mass%以下(0mass%を含む)、P: 1.0mass%以下(0mass%を含む)およびNi: 5.0mass%以下(0mass%を含む)を含有し、残部がFeおよび不可避的不純物の成分組成を有し、さらにCu系析出物の平均粒径が15nm以下、かつCu系析出物の存在頻度が 10^6 個/mm²以上であることを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板。

【0021】

本発明でのCu系析出物は、ほぼCu単体よりなるが、析出物が極微細になると、CuにFeの固溶体が含まれる場合もあり、このような場合も含めてCu系析出物という。なお、製造条件によっては粒界上に粗大なCu系析出物が認められることがあるが、析出物径および存在頻度に関しては実質的に強化に寄与する粒内析出物のみを対象とする。

【0022】

(2) 上記(1)において、成分組成として、さらにSb: 0.002~0.5mass%およびSn: 0.002~0.5mass%のいずれか1種または2種を含有することを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板。

【0023】

(3) Si: 1.0~7.0mass%、Cr: 1.0~8.0mass%、Cu: 0.35~3.0mass%、Mn: 3.0mass%以下(0mass%を含む)、Al: 3.0mass%以下(0mass%を含む)、P: 1.0mass%以下(0mass%を含む)およびNi: 5.0mass%以下(0mass%を含む)を含有し、残部がFeおよび不可避的不純物の成分組成を有するスラブに、熱間圧延を施し、そのままあるいは焼鈍した後、冷間圧延および/または温間圧延を施して最終板厚とし、次いで仕上げ焼鈍を、最終到達温度が650~1150℃および引き続き冷却過程の900~400℃における冷却速度が10℃/s以上の条件下に施し、その後400~650℃の温度にて時効処理を施すことを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板の製造方法。

【0024】

(4) 上記(3)において、スラブの成分組成として、さらにSb: 0.002~0.5mass%およびSn: 0.002~0.5mass%のいずれか1種または2種を含有することを特徴とする高周波磁気特性に優れた高強度無方向性電磁鋼板の製造方法。

【発明の効果】

【0025】

本発明によれば、磁気特性、とくに高周波磁気特性に優れ、しかも高い強度を有する電磁鋼板を安定して提供することできる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0026】

次に、本発明について、その構成要件毎に詳述する。

まず、成分組成範囲およびその限定理由を説明する。

Si: 1.0~7.0mass%

Siは、鋼板の電気抵抗を上昇させる主要元素である。さらに、Crとの相乗効果によって、電気抵抗を大幅に上昇させ、特に高周波域での磁気特性を改善するのに有効な成分であ

10

20

30

40

50

る。しかし、Si量が1.0mass%未満では、SiおよびCrを併用したとしても、従来の電磁鋼板と同程度の電気抵抗しか得られないため、良好な高周波磁気特性を得ることができない。一方、Si量が7.0mass%を超えると、Crを併用しても、通常圧延が可能なレベルの靱性を確保できない。従って、Si量は、1.0~7.0mass%の範囲に限定する。

【0027】

Cr: 1.0~8.0mass%

Crは、本発明の鋼板において、最も重要な成分の1つである。すなわち、CrはSiとの相乗効果によって鋼の固有抵抗を大幅に向上させ、さらには耐食性を向上させる基本的な合金成分である。しかも、 $Si + Al > 3.5mass\%$ 以上の場合にあっても、通常圧延が可能なレベルの靱性を得るために極めて有効な元素であり、その観点からは2.0mass%以上で含有させることが好ましい。なお、Si量やAl量が上記の場合よりも少ない場合は、Cr量をさらに減少しても加工性は確保できるが、Crの含有による脆性の改善効果および高電気抵抗化を実現するためには、1.0mass%以上のCrが必要である。一方、Cr量が8.0mass%を超えると、靱性向上効果が飽和する上、コストの上昇を招くことから、Cr含有量は1.0~8.0mass%の範囲に限定する。

【0028】

Cu: 0.35~3.0mass%

Cuも、本発明の鋼板において、最も重要な成分である。すなわち、時効処理によって微細なCu系析出物を形成させることによって、鉄損（履歴損）の劣化をほとんど伴わずに、大幅な強度上昇が可能となる。その効果を得るには、0.35mass%以上のCuが必要である。一方、3.0mass%を超えると粗大な析出物が形成されるため、鉄損の劣化が大きくなるとともに、強度上昇代も低下する。従って、Cuの添加量は0.35~3.0mass%の範囲に規制する。

【0029】

Mn: 3.0mass%以下（0mass%を含む）

Mnは、さらに電気抵抗を高めるのに有効であり、本発明の要旨を損なうことなく、さらなる磁気特性の改善が達成できる。従って、好ましくは0.10mass%以上で含有させる。しかし、大量に添加すると加工性が劣化するため、含有させる場合はその含有量を3.0mass%以下に制限することが好ましい。

【0030】

Al: 3.0mass%以下（0mass%を含む）

Alは、Crよりも強力な窒化物生成元素であり、焼鈍中に鋼板表層より侵入する窒素と最表層で結びつき、鋼板最表層にAlN層の形成、その内側にAlNを析出する。これにより鋼板内部への浸窒が防止される結果、Cr系窒化物の析出が抑制される。従来の電磁鋼板では、最表層のAlN析出は磁気特性を劣化させるため、抑制する必要があった。しかしながら、Fe-Cr-Si系電磁鋼板では、このAlN析出は磁気特性の改善に非常に有効なものである。また、Alは鋼溶製時からの含有窒素とともに粗大AlNを形成し、鋼溶製時からの含有窒素によるCr系窒化物の析出を抑制する効果もある。かような効果を得るには、0.10mass%以上で含有させることが好ましい。しかし、多量のAlを添加すると電気抵抗を高めることができるという、有利な面もあるが、3.0mass%を超えると、Crを含有させても通常圧延が可能な靱性を確保できなくなるため、含有させる場合はAl含有量は3.0mass%以下に規制することが好ましい。

【0031】

P: 1.0mass%以下（0mass%を含む）

Pは、比較的少量の添加でも大幅な固溶強化能が得られるため高強度化に極めて有効であり、好ましくは0.01mass%以上で含有させる。一方、過剰な含有は偏析による脆化を引き起し、粒界割れや圧延性の低下をもたらすため、含有させる場合はその含有量は1.0mass%以下に制限することが好ましい。

【0032】

Ni: 5.0mass%以下（0mass%を含む）

10

20

30

40

50

Niは、固溶強化による高強度化に有効な元素であり、好ましくは0.50mass%以上で含有させる。しかし、5.0mass%を超えると、その効果は飽和しコスト高をまねくだけになるため、含有させる場合はその上限を5.0mass%とすることが好ましい。

【0033】

さらに、Sb：0.002～0.5mass%およびSn：0.002～0.5mass%のいずれか1種または2種を含有することができる。

Sbおよび／またはSnの添加は、いずれも窒化を抑制する効果がある。これにより鋼板内部への浸窒が防止され、その結果Cr系窒化物の析出を抑制することができる。Cr系窒化物は磁気特性を大幅に劣化させるため、Fe-Cr-Si系電磁鋼板へのSb、Snの添加は、従来の電磁鋼板の場合よりも磁気特性改善効果は大きい。SbおよびSnがともに0.002mass%以下になると、窒化抑制効果が不十分になる。また、SbおよびSnは、窒化抑制効果に加えて集合組織の改善効果もあり、鋼板の磁気特性向上にさらに寄与する。

一方、0.50mass%を超えると、窒化抑制効果が飽和する上、コストの上昇を招いてしまう。従って、SbおよびSnの含有量は、それぞれSb：0.002～0.5mass%およびSn：0.002～0.5mass%の範囲とする。

【0034】

また、本発明においては、不可避免の不純物のうち、C、N、S、TiおよびNbにつき、C：0.010mass%以下、N：0.0050mass%以下、S：0.0050mass%以下、Ti：0.0050mass%以下およびNb：0.0050mass%以下に抑制することが好ましい。

【0035】

C：0.010mass%以下

Cは、Fe-Cr-Si系電磁鋼板の靱性を劣化させるため、できる限り低減することが望ましく、上記した成分範囲において、C量を0.010mass%以下に抑えることが好ましい。また、Cr系炭化物などの析出物による履歴損を防止する観点からも、C量は0.010mass%以下に抑えることが好ましい。

【0036】

N：0.0050mass%以下

Nは、Crと非常に結びつきやすくCr系窒化物を析出させる。よって、履歴損劣化の観点から、N量は0.0050mass%以下に低減することが好ましい。また、N量が多くなると靱性劣化を招くため、できるだけ低減することが好ましく、靱性劣化の観点からも、N量は0.0050mass%以下に抑えることが好ましい。

【0037】

S：0.0050mass%以下

Sは、MnSやCuSといった析出物を生成し、履歴損を劣化させるため、履歴損改善の観点からS量を0.0050mass%以下に抑えることが好ましい。

【0038】

Ti：0.0050mass%以下およびNb：0.0050mass%以下

TiおよびNbは、通常のCr含有鋼における加工性改善成分である反面、磁気特性を劣化させる成分である。この発明における加工性の改善は、Cr添加とCおよびNを低減させることで達成するため、TiおよびNbが有する加工性改善作用は必要としない。このために、TiおよびNbは磁気特性の観点からできるだけ低減することが望ましく、その許容量はTiおよびNb共に0.0050mass%以下に抑えることが好ましい。

【0039】

C、N、S、TiおよびNb以外の不純物の量は特に制限されないが、良好な破気特性と加工性を保つためには、従来の電磁鋼板と同様の不純物量に制限する必要がある。なお、C、N、S、TiおよびNbを含む全ての不純物について、磁気特性および加工性両方の観点から、できる限り低減することがより好ましい。

【0040】

さらに、本発明の電磁鋼板においては、鋼板中のCuを微細に析出させる必要がある。なぜなら、Cuが固溶状態（未析出状態）で存在しても、高強度化されないからである。

10

20

30

40

50

そして、Cuを析出させるに際し、このCu系析出物の平均粒径を15nm以下とする必要がある。すなわち、径が15nmを超えるCu系析出物は、鉄損を劣化させるだけでなく、高強度化に寄与しないため、鉄損を劣化させずに高強度化に寄与する15nm以下の微細析出物として、Cuを存在させることが重要である。

【0041】

ここで、Cu系析出物の径は、鋼板を走査透過型電子顕微鏡（STEM）を用いて観察（暗視野像）する際、 10^8 nm^2 の範囲に存在するCu系析出物の径を円相当径として求め、求めた値を平均したものである。

【0042】

また、このCu系析出物は、鋼板中に、 10^6 個/mm^2 以上で存在することも重要である。すなわち、Cu系析出物の量が不十分であるとCu系析出物はほとんど高強度化に寄与しない。

【0043】

次に、本発明の鋼板を製造する手順について、詳しく説明する。

本発明に係わる鉄損に優れた高強度無方向性電磁鋼板を製造するためには、まず、転炉あるいは電気炉などにて、前記した所定成分に溶製された鋼を、連続铸造あるいは造塊後の分塊圧延により鋼スラブとする。次いで、得られたスラブを熱間圧延し、必要に応じて熱延板焼鈍を施し、一回あるいは中間焼鈍を挟む二回以上の冷間圧延あるいは温間圧延を施して製品板厚とし、仕上げ焼鈍を施し、その後時効処理を施す。さらに、仕上げ焼鈍後のいずれかの段階において、必要に応じて絶縁被膜の塗布および焼き付け処理を行う。

【0044】

最終仕上げ焼鈍は、圧延による歪を除去するとともに必要な鉄損特性を得るために、再結晶により適切な結晶粒径を得ることを目的として行う。ここでの適性な結晶粒径は、求められる鉄損レベルにもよるが、一般に $20 \sim 200 \mu\text{m}$ であり、そのためには仕上げ焼鈍における最終到達温度を 700°C 以上とする必要がある。一方、 1150°C を超える焼鈍を行うと、粗大粒となり粒界割れを起こしやすくなるとともに、鋼板表面の耐窒化に伴う鉄損劣化が大きくなるため、その上限は 1150°C とする。

【0045】

この最終仕上げ焼鈍プロセスにおいて、無方向性電磁鋼板の製造では窒素+水素の還元性雰囲気一般在に用いられており、この雰囲気で焼鈍するのがコスト的に有利である。ところが、Fe-Cr-Si系電磁鋼板においては、この最終仕上げ焼鈍時の窒化によってCr系窒化物が形成され、磁気特性の劣化を招くのである。従って、Cr系窒化物の析出を抑制する必要がある、そのためには、窒化抑制元素であるSn、Sbや、窒化促進元素であるAlの添加だけでなく、窒素分圧を低減したり、窒素を全く使用しないなど、焼鈍雰囲気中の窒素分圧を制御することも有効である。

【0046】

ここに、発明者らは、Cuの微細析出を活用する場合、仕上げ焼鈍の冷却条件が重要であることを新たに見出した。すなわち、仕上げ焼鈍の冷却過程において、Cuの固溶温度から 600°C までの冷却速度が十分に速くないと、一部のCuが冷却中に粗大に析出するため、鉄損の劣化要因となり、またその後の時効焼鈍によっても粗大な析出物の量が増加し十分な強度が得られない場合があるのである。かような点を考慮したとき、Cu系析出物を微細に析出させるためには、仕上げ焼鈍の冷却速度を $900^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ の温度域で 10°C/s 以上とすることが必要であった。

【0047】

次に、時効処理は 400°C 以上 650°C 以下の温度で行う。すなわち、 400°C 未満の場合には、微細Cuの析出が不十分となり、高強度が得られない。一方、 650°C を超えると、Cu系析出物が粗大化して鉄損が劣化し、強度上昇量も減少するため、良好な強度-鉄損バランスを有する電磁鋼板が得られない。なお、適切な時効時間は処理温度にも依存するが、 $10 \text{ min} \sim 1000 \text{ h}$ が好適である。この時効処理の実施時期は、絶縁被膜の塗布焼付け前、焼付け後、またはプレス打ち抜きなどの加工後、などのいずれの時期で実施してもよい。

【0048】

なお、本発明において、鋼板の板厚は特に限定するものではないが、板厚を減じれば高周波磁気特性改善の効果が促進されるため、数百Hz以上の周波数域で、この減厚の効果を格段に得るためには、板厚を0.4mm以下にすることが望ましい。ただし、板厚を0.01mmより薄くすると、製造コストが増加するため、板厚は0.01～0.4mmの範囲とすることが好ましい。

【実施例1】

【0049】

表3に示す成分を有し、残部がFeと不可避免の不純物の組成に成る鋼を溶製し、熱間圧延により板厚2.0mmの熱延板とした。この熱延板に、冷間圧延により最終板厚0.25mmまたは0.15mmの冷延板とし、表4に示す焼鈍条件にて最終仕上焼鈍した。その際、冷却過程は、900℃から400℃までの温度域で20℃/sとした。その後、仕上焼鈍板に500℃および10hの時効処理を施した。なお、製品の組成は表3に示す鋼組成と同じであった。

10

【0050】

かくして得られた製品板について、Cu系析出物の存在頻度とその径を測定するとともに、高周波鉄損特性および降伏強度を評価した。なお、Cu系析出物の存在頻度とその径の測定は、STEMを用いて観察した暗視野像の約 10^8 nm^2 の範囲で実施し、析出物径はその範囲に存在するCu系析出物の径を円相当径として求めた平均値である。

【0051】

また、鉄損 $W_{10/1k}$ (W/kg)はエプスタイン試験法により測定した。降伏強度は、製品板の圧延方向とその直角方向について測定し、その値を平均して求めた。

20

これらの評価結果を表4に示す。

【0052】

【表 3】

表 3

鋼記号	成分組成											
	C (ppm)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (ppm)	Al (%)	N (ppm)	O (ppm)	Sb (%)	Sn (%)	Ti (%)	Nb (%)
A	13	2.0	0.25	0.02	10	1.5	14	18	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
B	18	2.0	0.25	0.02	10	1.5	11	15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
C	16	2.0	0.25	0.02	10	1.5	26	20	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
D	18	2.0	0.25	0.02	10	1.5	13	16	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
E	15	2.0	0.25	0.02	10	1.5	11	10	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
F	9	2.0	0.25	0.02	10	1.5	16	18	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
G	10	2.0	0.25	0.02	10	1.5	10	8	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
H	11	3.0	0.1	0.01	7	1.0	20	20	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
I	18	3.0	0.1	0.01	7	1.0	24	8	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
J	8	3.0	0.1	0.01	8	1.0	10	15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
K	15	3.0	0.1	0.01	7	1.0	15	11	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
L	18	3.0	0.1	0.01	8	1.0	16	15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
M	12	0.5	0.1	0.01	8	1.0	8	20	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
N	20	0.5	0.1	0.01	7	1.0	18	19	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
O	16	3.0	0.01	0.15	7	1.0	22	21	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
P	21	3.8	0.01	0.15	10	0.8	25	11	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Q	18	3.8	0.01	0.15	10	0.8	18	8	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
R	12	4.0	0.01	0.01	10	0.005	5	15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
S	20	3.0	0.2	0.005	15	1.0	22	22	0.02	<0.001	<0.001	<0.001
T	19	3.0	0.2	0.005	15	1.0	20	13	<0.001	0.03	<0.001	<0.001
U	10	3.0	0.2	0.005	15	1.0	25	18	0.01	0.02	<0.001	<0.001
V	9	4.5	0.01	0.005	7	0.005	6	11	0.05	<0.001	<0.001	<0.001
W	15	4.2	0.01	0.005	7	0.005	11	18	<0.001	0.05	<0.001	<0.001
X	11	4.2	0.01	0.005	7	0.5	10	9	<0.001	0.02	<0.001	<0.001
Y	9	4.2	0.01	0.005	7	0.5	15	7	0.05	<0.001	<0.001	<0.001
Z	20	5.2	0.01	0.005	7	0.005	5	7	0.03	<0.001	<0.001	<0.001

【 0 0 5 3 】

10

20

30

40

【表 4】

表4

鋼記号	板厚 (mm)	最終仕上げ焼鈍条件		鉄損 $W_{10.1k}$ (W/kg)	降伏強 度 (MPa)	Cu系析出物 径 (nm)	存在頻度 (個/mm ²)	備考
		焼鈍雰囲気	焼鈍温度(°C)					
A	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	41.45	530	析出物なし	0	比較例
B	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	41.95	660	4	1.4 × 10 ⁸	発明例
C	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	42.05	680	5	2.2 × 10 ⁸	発明例
D	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	42.20	700	9	4.2 × 10 ⁸	発明例
E	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	42.35	675	12	4.0 × 10 ⁸	発明例
F	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	47.10	570	50	3.2 × 10 ⁸	比較例
G	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	42.18	725	6	2.3 × 10 ⁸	発明例
H	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	39.89	580	3	1.0 × 10 ⁵	比較例
I	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	40.51	725	8	2.2 × 10 ⁸	発明例
J	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	40.25	750	7	2.0 × 10 ⁵	発明例
K	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	46.89	575	析出物なし	0	比較例
L	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	47.25	710	7	2.0 × 10 ⁸	比較例
M	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	48.98	360	析出物なし	0	比較例
N	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	49.35	510	5	2.2 × 10 ⁸	比較例
O	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	39.37	780	6	2.1 × 10 ⁸	発明例
P	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	37.54	850	5	1.9 × 10 ⁸	発明例
Q	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	36.85	710	析出物なし	0	比較例
R	0.25	Ar	980	39.12	775	5	2.1 × 10 ⁸	発明例
S	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	40.45	735	6	2.3 × 10 ⁸	発明例
T	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	40.19	725	8	2.2 × 10 ⁸	発明例
U	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	40.34	720	6	2.2 × 10 ⁸	発明例
V	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	29.03	825	8	1.9 × 10 ⁸	発明例
W	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	33.89	660	70	3.0 × 10 ⁸	比較例
X	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	28.56	815	7	2.0 × 10 ⁸	発明例
Y	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	28.02	665	5	3.5 × 10 ⁵	比較例
Z	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	25.46	905	5	2.1 × 10 ⁸	発明例

【0054】

表4に示すように、成分組成を本発明の範囲内に制御したものは、いずれもCu系析出物の平均粒径が15nm以下、かつCu系析出物の存在頻度が10⁶個/mm²以上であり、高強度を有し、かつ高周波鉄損に優れたものとなった。

【0055】

これに対し、Cu添加量が本発明範囲の下限より少ない鋼A、H、Q、Yによる鋼板は、良好な高周波鉄損特性を示すが、Cu系析出物の存在頻度が本発明の範囲外であるため強度が不十分である。Cu添加量が本発明範囲の上限を超える鋼F、Wによる鋼板では、Cu系析出物の平均粒径が15nmを超えるため、高周波鉄損特性および強度とも不十分である。Si、Crの添加量が本発明範囲外の鋼K、L、M、Nについて、Cuを添加している鋼L、Nによる鋼板は高強度を示すが、全ての鋼板で電気抵抗が低く、高周波鉄損特性が不十分である。

10

20

30

40

50

【実施例 2】

【0056】

表 3 に示す鋼 V, W, X, Y, Z に関しては、実施例 1 と同様の方法で最終仕上げ厚さ 0.15mm とした後に、表 5 に示す焼鈍条件で最終仕上げ焼鈍を行った。なお、最終仕上げ焼鈍における冷却過程は、900℃ から 400℃ までの温度域で 20℃/s とした。その後、仕上焼鈍板に 500℃ および 10 h の時効処理を施した。

かくして得られた鋼板について、実施例 1 と同様に評価を行い、鉄損についてはより高周波域での鉄損 $W_{0.5/20k}$ (W/kg) について調査した。

【0057】

【表 5】

鋼記号	板厚 (mm)	最終仕上げ焼鈍条件		鉄損 $W_{0.5/20k}$ (W/kg)	降伏強度 (MPa)	Cu系析出物径 (nm)	存在頻度 (個/mm ²)	備考
		焼鈍雰囲気	焼鈍温度 (°C)					
V	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	850	9.45	870	6	2.0 × 10 ⁸	発明例
W	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	850	11.55	705	60	3.2 × 10 ⁸	比較例
X	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	850	8.78	860	7	2.0 × 10 ⁸	発明例
Y	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	850	8.39	710	6	5.0 × 10 ⁵	比較例
Z	0.15	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	850	7.69	945	6	2.2 × 10 ⁸	発明例

【0058】

表5に示すように、Cu添加量が本発明範囲の下限より少ない鋼Yによる鋼板は、良好な高周波鉄損特性を示すが、Cu系析出物の存在頻度が本発明の範囲外であるため強度が不十分である。Cu添加量が本発明範囲の上限を超える鋼Wによる鋼板では、Cu系析出物の平均

10

20

30

40

50

粒径が15nmを超えるため、高周波鉄損特性および強度とも不十分である。なお、組成を本発明範囲に制御した鋼V, X, Zによる鋼板は、Cu系析出物の平均粒径が15nm以下、かつCu系析出物の存在頻度が 10^6 個/mm²以上であり、高強度を有し、かつ高周波鉄損に優れたものとなった。

【実施例3】

【0059】

表6に示す成分を有し、残部がFeと不可避的不純物の組成に成る鋼を溶製し、熱間圧延により板厚2.0mmの熱延板とした。この熱延板に、温度900℃で、熱延板焼鈍を施し、その後800℃の中間焼鈍を挟む2回冷延法により最終板厚0.25mmまたは0.15mmの冷延板とし、表7に示す焼鈍条件にて最終仕上焼鈍した。その後、表7に示す条件にて仕上焼鈍板に時効処理を施した。なお、製品の組成は表6に示す鋼組成と同じであった。

10

【0060】

かくして得られた製品板について、実施例1の場合と同様の評価を行った。その評価結果を表7に併記するように、仕上げ焼鈍条件および時効処理条件を本発明範囲内に制御したものは、製品板において優れた鉄損と高強度とを得ることができた。

【0061】

一方、仕上げ焼鈍過程における冷却速度が遅い場合や、時効温度が高すぎる場合は、Cu系析出物が粗大化し、高周波鉄損特性を劣化するばかりでなく、高強度も得ることができなかった。また、時効温度が低すぎる場合は、Cu系析出物の存在頻度が本発明の範囲外であるため、優れた高周波鉄損特性は示すが、高強度を得ることができなかった。

20

【0062】

【表 6】

表6

成分組成														
C (ppm)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (ppm)	Al (%)	N (ppm)	O (ppm)	Sb (%)	Sn (%)	Ti (%)	Nb (%)	Cr (%)	Cu (%)	Ni (%)
8	3	0.25	0.005	7	1	18	15	0.02	<0.001	<0.001	<0.001	3.0	1.5	0.01
10	4.2	0.01	0.005	7	0.7	20	10	<0.001	0.04	<0.001	<0.001	3.0	1.2	0.01

10

20

30

40

50

【 0 0 6 3 】

【表 7】

鋼記号	板厚 (mm)	最終仕上げ焼鈍条件			時効温度 (°C)	鉄損 $W_{10/1k}$ (W/kg)	降伏強度 (MPa)	Cu系析出物径 (nm)	存在頻度 (個/mm ²)	備考
		焼鈍雰囲気	焼鈍温度(°C)	冷却速度 (°C/s)						
1	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	500	40.35	730	5	2.3×10^8	発明例
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	250	39.89	580	4	6.0×10^5	比較例
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	680	45.12	590	70	9.0×10^7	比較例
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	5	500	44.98	595	50	1.3×10^8	比較例
2	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	500	37.42	830	6	2.0×10^8	発明例
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	250	36.89	650	3	5.5×10^5	比較例
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	20	680	41.16	670	60	8.0×10^7	比較例
	0.25	N ₂ : H ₂ = 70 : 30	980	5	500	41.31	665	55	1.0×10^8	比較例

表 7

10

20

30

40

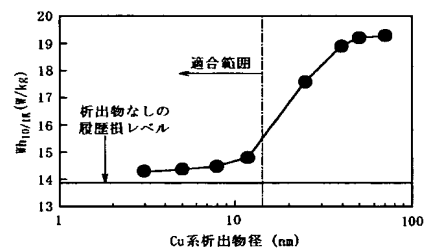
50

【図面の簡単な説明】

【 0 0 6 4 】

【図 1】 Cu系析出物の径と履歴損との関係を示す図である。

【 図 1 】



フロントページの続き

(72)発明者 河野 正樹

東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社内

F ターム(参考) 4K033 RA03 SA03 SA04 TA03

5E041 AA02 CA04 HB11 NN01 NN18